

УДК 620.9:662.638

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Докт. техн. наук, проф. ЖИХАР Г. И.

Белорусский национальный технический университет

Недостаточное обеспечение Республики Беларусь собственными запасами ископаемого топлива, 82–85 % которого импортируется в республику из одного источника, и стремительный рост цен на нефть и природный газ на мировом рынке вынуждают по-новому взглянуть на решение проблемы обеспечения страны топливно-энергетическими ресурсами. Замещение местными видами топлива и горючими отходами производства импортируемых природного газа, нефтепродуктов и угля – одно из основных мероприятий постановления Совета Министров Республики Беларусь от 7 декабря 2009 г. № 1593 «Об установлении заданий по доле местных топливно-энергетических ресурсов в балансе котельно-печного топлива» [1].

Этим постановлением установлены следующие задания по годам по Республике Беларусь: 2009 г. – 19,4 %; 2010 г. – 20,5; 2011 г. – 22,2; 2012 г. – 25 % (табл. 1).

Таблица 1

**Задания по доле местных топливно-энергетических ресурсов
в балансе котельно-печного топлива по Минэнерго**

	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
ГПО «Белтопгаз», %	45,2	45,7	47,5	48,0
ГПО «Белэнерго», %	1,7	2,1	2,5	5,0
ОАО «Белтрансгаз», %	3,8	4,0	4,2	4,5

В связи с ростом цен на традиционные импортируемые энергоносители и повышением себестоимости производимой продукции в Республике Беларусь ведется поиск местных альтернативных источников энергии. Одним из таких, пожалуй, наиболее эффективных источников является биотопливо. Использование только древесных отходов лесного комплекса на топливо при выработке только тепловой и электрической энергии эквивалентно, как минимум, 2,5 млн т условного топлива (т у. т.) и обеспечивает снижение импорта энергоресурсов в страну.

Подвести Беларусь к 25-процентному потреблению собственных ресурсов удастся не ранее 2012 г. Это обусловлено необходимостью реконструкции существующих топливодобывающих предприятий и перевода значительной части используемого в данный момент оборудования на сжигание местных видов топлива. Данные мероприятия потребуют не только большего количества времени, но и выделения на них больших денежных средств.

Дров и древесных отходов, которые можно использовать в качестве топлива, в республике достаточно. По данным Минлесхоза, в республике имеются древесные ресурсы для увеличения заготовки в ближайшем будущем. В табл. 2 приведены общие сведения о лесах Беларуси [2]. Как видно из таблицы, уже в 2001 г. лесистость составила 37,8 %, что значительно больше многих стран Европы, за исключением Норвегии (39,2 %), Австрии (47,6 %), Швеции (74,1 %) и Финляндии (74,8 %). Из табл. 2 следует, что ежегодно площадь лесов в стране увеличивается.

Таблица 2

Год учета лесного хозяйства	Площадь лесов, тыс. га				Леси- стость, %	Запасы древесины, млн м ³	
	Общая	В том числе				Общий	В том числ спелых древостоев
		Всего лесных земель	Из нее покрыто лесом	Спелых и пере- стойных			
1993	8205,1	7478,5	7042,8	246,8	33,9	632,60	48,3
1988	8054,8	7301,6	7027,7	217,2	33,9	921,32	46,2
1994	8676,1	7775,9	7371,7	350,1	35,5	1093,23	74,5
2001	9247,5	8275,7	7851,1	623,0	37,8	1339,85	129,19

По оценке специалистов Минлесхоза, в качестве топлива надо заготавливать в первую очередь древесные отходы, которые не используются полностью. Например, опилки – отходы деревообрабатывающих производств – используются для изготовления ДСП. Отходы лесозаготовки – кора, сучья, вершины деревьев – практически не перерабатываются. Одна из главных проблем в этом вопросе – транспортировка. Если опилки и ветки придется перевозить более чем за 50 км от места заготовки, их стоимость резко возрастает.

Серьезным вопросом является организация транспортировки древесного топлива. Многие источники указывают на то, что приемлемой рентабельности можно добиться при использовании грузовых автомобилей с объемом кузова более 60 м³. В Швеции при перевозке щепы применяют грузовики с объемом кузова 90–120 м³. В Беларуси такая техника не производится, т. е. необходимо либо закупать ее за рубежом, либо наладить собственное производство.

Для торфа требуется разрабатывать новые месторождения и закупать дополнительное технологическое оборудование. Сегодня добычу торфа ведет 31 промышленное предприятие системы Минэнерго, обеспечив в 2008 г. поставку 3,2 млн т торфа. В то же время эксплуатационные запасы торфа составляют 111 млн т. Поэтому в ближайшие годы, по оценке разработчиков программы, можно увеличить добычу торфа и довести ее к 2012 г. до 4,43 млн т.

Для потребления местных видов топлива придется, что уже и делается, строить новые котельные и мини-ТЭЦ либо переоснащать уже имеющиеся. Несмотря на то, что природный газ является наилучшим топливом для электрической и тепловой энергии, запасы этого ресурса неограничены, что приводит к повышению его стоимости. Это обстоятельство необходимо учитывать при рассмотрении возможности перевода газовых котельных на местные топлива.

В зарубежной периодической печати, а в последнее время в связи со сложившейся энергетической ситуацией и в нашей республике много внимания уделяется вопросам экономии энергии и топлива в лесных отраслях промышленности, а также замены, где это возможно и целесообразно, дефицитного нефтегазового сырья топливом из древесных отходов и низкосортной древесины. Обсуждаются проблемы использования древесной биомассы в качестве топлива, приводятся примеры работы электростанций и котельных установок на данном виде топлива, сведения о создании новых, более эффективных установок, работающих на древесном топливе, а также о разработке вспомогательного оборудования для подготовки, складирования, хранения и транспортировки данного топлива.

Американские специалисты считают, что вовлечение в топливный баланс древесных отходов может полностью удовлетворить потребности в топливе местных отраслей. Отмечают, что в лесопильном производстве почти половина сырья переходит в отходы, а на мебельных предприятиях еще половина пиломатериалов превращается в отходы. Все используемые для технологической переработки отходы лесозаготовок и деревообработки должны найти применение в энергетике предприятий. В целях увеличения эффективности энергетического использования древесной биомассы министерство энергетики США проводит в этой области расширяющиеся с каждым годом научно-исследовательские работы.

В Канаде принята специальная программа правительства по использованию древесных отходов в качестве энергетического сырья. Цель программы – удвоить по сравнению с уже существующим уровнем и довести до 7 % долю древесных и коммунальных отходов в топливном балансе страны.

Активно ведутся работы по вовлечению в топливный баланс древесной биомассы в Швеции, Финляндии, Норвегии, Австрии, Германии и Швейцарии.

На основании анализа энергетического использования древесной биомассы можно сделать вывод о том, что главными направлениями проведения научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ в этой области за рубежом являются:

- поиски возможностей увеличения резервов древесной биомассы путем повышения производительности лесных массивов и оптимизации сроков рубки при заготовке энергетической биомассы;
- повышение эффективности использования различных видов древесной биомассы при непосредственном сжигании ее в топках котлов для выработки тепловой и электрической энергии;
- производство из древесной биомассы твердого топлива с повышенными показателями по транспортабельности, теплоте сгорания и водостойкости;

- получение из древесной биомассы жидкого топлива для транспортных машин;
- производство на основе древесной биомассы газообразного топлива, пригодного для использования в современных системах газоснабжения, а также в газобаллонных транспортных машинах.

Зарубежные специалисты выделяют два направления работы по увеличению древесной биомассы для энергетического использования: во-первых, создание энергетических плантаций и, во-вторых, повышение степени использования биомассы в существующих эксплуатируемых лесонасаждениях.

Непосредственно образующиеся в процессе заготовки древесины и ее первичной обработки древесные отходы и щепа имеют малую плотность и низкую теплоту сгорания. Вследствие этого они как топливо малотранспортабельны и при сжигании развивают недостаточно высокую температуру горения, что исключает их применение для высокотемпературных процессов и снижает теплопроизводительность и КПД котельных установок, в которых они используются. Так, в западных странах проводятся исследования по разработке и совершенствованию производства транспортабельного, высококачественного топлива на базе древесного сырья. Применение древесных брикетов, по мнению специалистов, особо привлекательно для бытового использования, так как в их составе не содержатся сера и другие вредные элементы.

В связи с обострением ситуации с энергоресурсами в их первичном виде (природный газ, нефтепродукты) вопросами использования древесины и древесных отходов для получения энергии занимаются специальные органы ООН. Комитет по лесоматериалам ФАО, отдел энергетики Европейской Экономической комиссии ЕЭК проанализировали тенденции и потенциальные возможности использования древесины как возобновляемого источника энергии. При этом было установлено, что в развитых странах доля энергии, получаемая из древесины, от общего потребления энергии невелика и составляет: в США – 1,6 %, Канаде – 2,2, Франции – 1,8, Германии – 0,9, в Швейцарии – 1,1 %; повышенное значение доли использования древесного топлива от общего потребления имеет место в Финляндии – 8,9 %, Швеции – 3,3 %.

Экономически целесообразный потенциал использования дров и древесных отходов для производства тепловой и электрической энергии в Беларуси приведен в табл. 3 [2].

Таблица 3

Год	Дрова		Отходы деревообработки, млн т у. т.	Итого, млн т у. т.
	млн м ³	млн т у. т.		
2003	4,18	1,11	0,28	1,39
2004	4,51	1,20	0,29	1,49
2005	5,36	1,43	0,31	1,74
2006	6,30	1,68	0,32	2,00
2007	7,29	1,94	0,33	2,27
2008	8,08	2,15	0,35	2,50
2009	8,95	2,38	0,36	2,74

Из табл. 3 видно, что экономически целесообразный потенциал использования дров и древесных отходов для производства тепловой и электрической энергии в Беларуси в 2009 г. увеличился более чем в два раза по сравнению с 2003 г.

Для потребления местных видов топлива придется строить и уже построены новые мини-ТЭЦ и котельные либо переоснащать уже существующие.

В 2006 г. была построена Вилейская мини-ТЭЦ, на которой установлено следующее основное оборудование:

котлоагрегат KE-25-24-350 (ЗАО Axis Industries, Литва), работающий на древесном топливе:

- номинальная паропроизводительность – 22 т/ч;
- температура перегретого пара – 350 °С;
- давление перегретого пара – 2,4 МПа;
- КПД (брутто) – 85 %;
- диапазон изменения паропроизводительности – 30–100 %;
- температура уходящих газов за экономайзером – 108 °С;
- топка с кипящим слоем;

турбогенератор Р-2,4-2,4/0,15 (ЗАО «Энерготех», Россия):

- номинальная электрическая мощность – 2,4 МВт;
- номинальная частота вращения ротора – 7000 об/мин;

основные технико-экономические показатели ТЭЦ по проекту:

- выработка электроэнергии – 15,3 млн кВт·ч;
- отпуск теплоэнергии – 162,4 тыс. Гкал;
- удельный расход топлива:
 - на отпуск электроэнергии – 164,2 г/(кВт·ч);
 - на отпуск теплоэнергии – 178,9 кг/Гкал;
- себестоимость отпущенной:
 - с шин электроэнергии – 3,59 цента/(кВт·ч), в том числе топливная составляющая – 1,63 цента/(кВт·ч);
 - теплоэнергии – 37,5 дол./Гкал, в том числе топливная составляющая – 17,0 дол./Гкал.

Заготовка и доставка древесного топлива на мини-ТЭЦ осуществляются предприятиями Министерства лесного хозяйства автомобильным транспортом с оборудованной площадки, расположенной на территории Вилейского лесхоза в 800 м от мини-ТЭЦ. Затем полученная древесина перерабатывается в прессованную щепу. Низшая теплота сгорания такого топлива составляет 9403 кДж/кг (2246 ккал/кг). Доля транспортных расходов в полной ее себестоимости составляет 5,8 %, что обусловливается выгодным расположением мини-ТЭЦ по отношению к источнику топлива.

В конце декабря 2009 г. введена в эксплуатацию Пружанская ТЭЦ с современной технологией сжигания древесного топлива и торфа. Для сжигания топлива применена коническая колосниковая решетка, разработанная финской фирмой Wartsila [3]. Она позволяет сжигать кору, опилки, древесную щепу и т. п. с влажностью до 55 % без снижения мощности. Расчетный годовой расход местных видов топлива по ТЭЦ составляет: щепы – 26,6 тыс. т/год (7,794 тыс. т у. т.); торфа – 18,7 (5,196), т. е. всего – 45,3 тыс. т/год (12,99 тыс. т у. т.). Расчетная тепловая нагрузка зоны тепло-

снабжения ТЭЦ составляет 31,578 Гкал/ч, в том числе на горячее водоснабжение – 6,039 Гкал/ч [2].

Установленная электрическая мощность ТЭЦ составляет 3,7 МВт, тепловая – 58 Гкал/ч. Ввод в эксплуатацию ТЭЦ позволил обеспечить до 60 % потребности в электрической и 95 % – в тепловой энергии в г. Пружаны.

Последние данные по удельному расходу топлива на отпуск электрической энергии составили 189,1 г у. т. на 1 кВт·ч при плане 195,0, на тепловую энергию – 183,7 кг у. т. на 1 Гкал при плане 188,2 при работе на одной щепе. В настоящее время ТЭЦ выходит на сжигание смеси топлива – щепы (60 %) и фрезерного торфа (40 %). Щепа пока недостаточно. Но на перспективу проблем с местным топливом возникать не должно, так как станция расположена близко к сырьевым источникам – торфозаготовкам и лесным массивам. Поможет сырьем и филиал РУП «Брестэнерго» – сельскохозяйственное предприятие «Агроэнерго-Зеленевичи», которое расположено в Пружанском районе. На его базе планируют перейти к выращиванию быстрорастущих древесных культур, которые и пойдут на дальнейшую переработку и использование в качестве местного топлива.

Электростанции, работающие на местных топливах, построены и в других городах страны. Например, на Осиповичской мини-ТЭЦ введена новая котельная установка для сжигания древесных отходов и фрезерного торфа.

В соответствии с программой внедрения энергосберегающих технологий с применением комбинированной выработки тепловой и электрической энергии компания «Яровит Энерго» реализовала проект по внедрению технологий с использованием местных видов топлива на Осиповичской мини-ТЭЦ, где введен в эксплуатацию блочный турбогенератор ТГ1,5/10,5Р13/03. Здесь применена технология комбинированного производства электроэнергии и теплоты с использованием противодавленческой паровой турбины. Она заключается в том, что для утилизации потенциальной энергии пара предлагается понижать параметры пара до требуемых не посредством редуцирования, а в процессе совершения им работы. Для этого параллельно редуциционному устройству устанавливается электрогенерирующий комплекс с паровой противодавленческой турбиной. Пар на технологический процесс направляется через турбину, а работа, совершаемая в ней паром, используется для привода электрического генератора. Электроэнергия, производимая генератором, используется для собственных нужд предприятия, на котором она установлена.

На Осиповичской мини-ТЭЦ введена новая котельная установка для сжигания древесных отходов и фрезерного торфа.

Энергетическая котельная установка предназначена для выработки перегретого пара за счет сжигания древесного топлива и фрезерного торфа как раздельно, так и в смеси в котлоагрегате КЕ-10-24-300ОГМВ, оснащенном предтопком, где использован принцип сжигания топлива в вихревой топке, топке скоростного горения и топке с шурующей планкой конструкции ОАО «Бийский котельный завод». Фрезерный торф предварительно поступает на дисковую сортировку, разделяющую по фракционному составу и передающую мелкую фракцию далее для поступления в бункер топлива перед котлом.

В котле КЕ-10-24-300ОГМВ сжигаются древесные отходы и фрезерный торф. Элементарный состав древесных отходов следующий: $W^r = 40\%$; $A^r = 0,6\%$; $C^r = 30,3\%$; $S_{\text{п+о}} = 0$; $H^r = 3,6\%$; $N^r = 0,4\%$; $O^r = 2,5\%$. Максимальная влажность $W_{\text{max}}^r = 45\%$; зольность на сухую массу $A^d = 1,0\%$. Выход летучих на сухую беззольную массу $V^{\text{daf}} = 85\%$. Низшая теплота сгорания древесных отходов (средняя) $Q_1^r = 10224$ кДж/кг (2440 ккал/кг).

Зола древесных отходов характеризуется следующими температурами:

$t_A = 1165$ °С – температура начала деформации;

$t_B = 1190$ °С – то же размягчения золы;

$t_C = 1190$ °С – то же жидкоплавкого состояния.

Древесная зола – хорошее удобрение для сельского хозяйства, пользующееся большим спросом.

Элементарный состав фрезерного торфа следующий (средний): $W^r = 50\%$; $A^r = 6,3\%$; $S_{\text{п+о}}^r = 0,1\%$; $C^r = 24,7\%$; $H^r = 2,6\%$; $N^r = 1,1\%$; $O^r = 15,2\%$. Максимальная влажность $W_{\text{max}}^r = 52\%$; зольность на сухую массу $A^d = 12,5\%$. Выход летучих на сухую беззольную массу $V^{\text{daf}} = 70\%$. Низшая теплота сгорания фрезерного торфа $Q_1^r = 8120$ кДж/кг (1940 ккал/кг).

Зола фрезерного торфа склонна к образованию прочных первичных отложений. Температура начального шлакования $t_{\text{н.шл}} = 950$ °С. Зола фрезерного торфа характеризуется следующими температурами:

$t_A = 1140$ °С – температура начала деформации;

$t_B = 1280$ °С – то же размягчения золы;

$t_C = 1350$ °С – то же жидкоплавкого состояния.

Элементарный состав золы на бессульфатную массу следующий: $\text{SiO}_2 = 35,5\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 8,8\%$; $\text{TiO}_2 = 0,4\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 16,3\%$; $\text{CaO} = 32,0\%$; $\text{MgO} = 3,7\%$; $\text{K}_2\text{O} = 1,4\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 1,6\%$.

Зола фрезерного торфа практического применения не имеет.

К числу местных топлив относится также кора различных пород древесины. Большое количество коры имеется в местах лесных разработок. Состав горючей массы коры приведен в табл. 4 [4], а низшая теплота сгорания – в табл. 5 [4].

Таблица 4

Состав горючей массы коры различных пород древесины
в расчете на абсолютно сухую горючую массу, %

Порода дерева	Состав горючей массы					Количество летучих веществ, %
	H	C	O + N*	S	A	
Ель, в среднем (луб, кора)	5,4	51,0	40,7	0,04	2,6	72,5
Сосна, в среднем	7,5	53,4	39,2	0,03	1,3	80,0
Береза, в среднем	7,5	59,2	32,0	0,03	1,7	77,0
Осина, в среднем	6,0	51,3	40,0	0,05	2,5	65,0

* Содержание N составляет $\sim(2,0-2,5)\%$.

Таблица 5

Низшая теплота сгорания коры основных пород древесины, МДж/кг

Порода	Влажность коры, %			
	10	50	70	80
Ель	16,7	8,0	3,7	1,5
Сосна	18,5	8,9	4,1	1,7

Береза	19,1	9,2	4,3	1,8
--------	------	-----	-----	-----

Таблица 6

Химический элемент	Ель	Сосна
Всего золы, % по массе	4,4	2,8
Кальций, %	0,7	0,5
Фосфор, %	0,17	0,15
Магний, %	0,6	0,1
Железо, %	178	125
Марганец, мг/кг	316	318
Медь, мг/кг	14	7
Цинк, мг/кг	29	30
Кобальт, мг/кг	0,08	0,09
Химический элемент	Береза	Осина
Зола, % на сухую массу	4,2	7,9
Калий, %	0,8	1,3
Фосфор, %	0,2	0,2
Магний, %	0,3	–
Клетчатка, % (лигнит + целлюлоза)	18	21

Низшую теплоту сгорания коры основных пород древесины можно определить по упрощенным формулам НПО ЦКТИ:

- для коры осины, тополя, ели $Q_i^r = 4,19(4505 - 51,7W)$, кДж/кг;

- для коры сосны и лиственницы $Q_i^r = 4,19 \times (5000 - 59W)$, кДж/кг;

- для коры березы $Q_i^r = 4,19(5135 - 58,8W)$, кДж/кг.

Химический состав золы различных пород древесины приведен в табл. 6.

Низшая теплота сгорания (кДж/кг) на сухую массу для коры некоторых пород: сосна – 20000; ель – 18600; береза – 22700.

Плотность коры различных пород древесины, кг/м³, приводится в табл. 7.

Таблица 7

Порода	Со свежесрубленных стволов	
	В абсолютно сухом состоянии	При $W = 15\%$
Сосна, среднее значение	652	688
Ель	715	737
Лиственница	418	430
Береза	736	746

Использование биомассы для комбинированного производства теплоты и электроэнергии получило широкое применение в СНГ и за рубежом [5, 6]. Например, в Швеции [6] в 2000 г. пущена станция комбинированного производства теплоты и электроэнергии, включающая паровой котел с пузырьковым кипящим слоем и установку конденсации дымовых газов. Паровой котел BFB производства фирмы Mesto Power (Финляндия) тепловой мощностью 110 МВт рассчитан на параметры пара 14,0 МПа, 540 °С и расход пара 41 кг/с (150 т/ч). Главным видом топлива при производстве энергии в настоящее время стала биомасса. В 2007 г. ее потребление составило около 1 млн м³, что соответствует выработке 832 млн кВт·ч теплоты. В состав сжигаемой биомассы входят опилки (6 %), кора и отходы лесопильных заводов (18 %), лесные отходы, включая древесную щепу (74 %), и прочие древесные остатки (2 %). Цена биотоплива зависит от его влажности, теплоты сгорания и других факторов.

Мазут (до 5 % общего объема топлива) сжигается только при пиковой нагрузке в наиболее холодные зимние дни с очень высоким потреблением теплоты, а также при пусках и остановках котла.

На выходе дымовых газов из котла BFB после электрофилтра установлен скруббер конденсации дымовых газов с увлажнителем первичного воздуха, идущего на горелки. Через пластинчатый теплообменник он нагревает «обратную» воду, поступающую из тепловой сети с температурой 54 °С. При этом дымовые газы охлаждаются с 139 до 30 °С, обеспечивая регенерацию теплоты в объеме 22,5 %. Проведенными испытаниями установлены высокие технико-экономические показатели работы котла BFB. При сжигании биотоплива КПД его достигает 90 %, а с учетом использования теплоты конденсации дымовых газов – еще более высоких значений. Количество удаляемой золы относительно невелико, а содержание в ней несгоревшего углерода (механического недожога) сведено к минимуму.

Расширенное использование возобновляемых источников энергии, к которым относится биотопливо, способствует значительному сокращению вредных выбросов в атмосферу, включая диоксид углерода (CO₂). Поэтому опыт создания, освоения и исследований установок на биомассе имеет большое практическое значение для дальнейшего их развития в будущем.

В перспективе в Беларуси будут построены более 160 энергоустановок, использующих местное топливо. Поэтому необходимо определить наиболее надежные и эффективные проекты этих установок применительно к условиям нашей страны. В настоящее время энергетические установки, работающие на местных видах топлива, построены в Жодино, Пинске и других городах страны.

ВЫВОДЫ

1. Для увеличения доли местного топлива в энергобалансе Беларуси необходимо взаимодействие заинтересованных министерств и ведомств в вопросе заготовки и транспортировки местных топлив, которое должно быть взаимовыгодным и продуманным.

2. Необходимо определить наиболее эффективные и надежные проекты энергоустановок для использования местных топлив в широких масштабах применительно к условиям Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. О б у с т а н о в л е н и и заданий по доле местных топливно-энергетических ресурсов в балансе котельно-печного топлива: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 7 дек. 2009 г., № 1593. – Энергетика и ТЭК. – № 1. – С. 27, 28.
2. М а л а я энергетика на биотопливе / А. В. Вавилов [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2002. – 347 с.
3. Ю д и н, А. Пружанская ТЭЦ: современные технологии в использовании топлива / А. Юдин. – Энергетика Беларуси. – 2010. – № 6.
4. Ж и т к о в, А. В. Утилизация древесной коры / А. В. Житков. – М.: Лесная промышленность, 1985. – 136 с.
5. П и н ч у к, Ю. В. Комплексное использование вторичных энергоресурсов в системах централизованного теплоснабжения / Ю. В. Пинчук // Промышленная энергетика. – 1980. – № 8. – С. 2–4.
6. В и х р е в, Ю. В. Опыт сжигания биомассы в кипящем слое при комбинированном производстве энергии / Ю. В. Вихрев // Энергетика за рубежом. – 2010. – Вып. 1. – С. 32–36.